

Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta,
Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů

Bobtnavé zeminy v ČR **Swelling soils in the Czech Republic**

Bakalářská práce

Michal Fencel



Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Boháč, CSc.

Praha 2010

Poděkování

Své poděkování bych rád věnoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Boháčovi, CSc. za poskytnutí cenných informačních zdrojů, konzultací a odborného vedení. Práce byla připravena za podpory grantu GAUK 11709.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval zcela samostatně a všechny použité informační zdroje řádně uvedl v seznamu literatury.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá bobtnavými zeminami a snaží se vymezit jejich rozmístění v rámci území České republiky. Bobtnání zemin je proces, při kterém zemina zvětšuje svůj objem a/nebo vyvozuje bobtnací tlaky a tím vyvolává značné problémy na stavbách, v jejichž podloží se tyto objemově nestálé zeminy nacházejí. Objemové změny postihují všechny zeminy v závislosti na jejich stupni nasycení, zatížení respektive odlehčení a na minerálním složení.

V práci jsou popsány základní principy bobtnání zemin, které vzcházejí z literární rešerše. Kromě samotného bobtnání zemin se bakalářská práce zabývá obecným popisem jílových minerálů, převážně smektitů, rozpoznáváním potenciálně bobtnavých zemin na základě mineralogické identifikace a metod zahrnujících přímá a nepřímá měření. Část je také věnována publikovaným měřením bobtnacích tlaků zemin z vybraných lokalit v České republice.

Abstract

This thesis deals with swelling soils and tries to determine their occurrence in the Czech Republic. Swelling of soils is a process in which the soil either increases its volume and/or exerts the swelling pressure, and thereby typically causes considerable problems in buildings and other structures. Volume changes affect all soils, depending on the degree of saturation, the stress level and its changes, and on the soil mineral composition.

Based on the literature review the thesis describes the basic principles of swelling. It deals with the general description of clay minerals, mostly smectite, and their role in the phenomenon of swelling and in the identification of potentially swelling soils. Finally the published data on swelling pressures of soils from selected sites in the Czech Republic are summarised.

1. ÚVOD	1
2. BOBTNÁNÍ	2
2.1 Bobtnání vlivem odlehčení.....	2
2.1.1 Nenasycená zemina	3
2.1.2 Stupeň nasycení	4
2.2 Bobtnání nenasycených zemin vlivem dotace vodou.....	6
2.3 Smrštění.....	6
2.4 Bobtnací tlak a potenciál	6
2.4.1 Měření v oedometru	6
2.4.2 Postup stanovení bobtnacího tlaku	7
2.5 Index plasticity, I_p	8
2.6 Vlastnosti zeminy ovlivňující bobtnací-smršťovací potenciál	8
2.6.1 Trvalé vlastnosti	8
2.6.2 Stav zeminy	8
2.7 Vnější podmínky, které ovlivňují bobtnací-smršťovací potenciál	9
3. BOBTNAVÉ ZEMINY	10
3.1 Jíl	10
3.1.1 Interakce s vodou.....	10
3.1.2 Bobtnání jílu	10
3.2 Jílové minerály	11
3.2.1 Fylosilikáty.....	11
3.2.2 Rozdělení jílových minerálů.....	13
3.2.3 Náboj	13
3.2.4 Obecné vlastnosti jílových minerálů	14
3.3 Minerály skupiny smektitů.....	14
3.3.1 Dioktaedrické smektity.....	15
3.3.2 Trioktaedrické smektity.....	15
4. ROZPOZNÁNÍ POTENCIÁLNĚ BOBTNAVÝCH ZEMIN.....	16
4.1 Mineralogická identifikace.....	16
4.2 Skupina metod zahrnujících nepřímé metody měření	17
4.3 Metoda přímých měření	18
5. BOBTNAVÉ ZEMINY ČESKÉ REPUBLIKY	19
5.2 Problémy způsobené bobtnáním zemin v ČR.....	20
5.2.1 Tunel Třebovice	20

5.2.2 Kladno, budova banky.....	20
5.2.3 Příbram, zvedání kolejnic v uranovém dole	21
5.3 Příklady lokalit s výskytem bobtnacích zemin	22
5.3.1 Brno, areál Boby sport.....	22
5.3.2 Braňany, Most, lom Brník.....	22
5.3.3 Třebovice, vlakový tunel	24
5.3.4 Shrnutí bobtnacích tlaků z vybraných lokalit	25
6. ZÁVĚR.....	26
7. SEZNAM LITERATURY	27

1. ÚVOD

Cílem předložené práce je shromáždit informace o bobtnavých zemínách na území České republiky.

Termíny bobtnání, bobtnavé zeminy, objemové změny, objemově nestálé zeminy však nejsou v odborné literatuře jednoznačně definovány. Objemovým změnám podléhají všechny zeminy, neboť i nasycená hrubozrnná zemina (písek) při odlehčení (snížení středního napětí) zvětšuje svůj objem. Pro takovou deformaci zavádí ČSN CEN ISO/TS17892-5 (ČSN 2005) poněkud překvapivě termín bobtnání pro „expanzi vlivem redukce efektivního napětí“. Zároveň se zavádí pro index stlačitelnosti při odlehčení název „index bobtnání“. V užším smyslu se zpravidla termínem bobtnání rozumí vnitřně krystalické či osmotické procesy spojené s adsorpcí vody a zvětšováním objemu některých jílových minerálů, především ze skupiny smektitů. V jiných pracích je však termín bobtnání užíván pro objemové změny zemin spojené se změnou stupně nasycení.

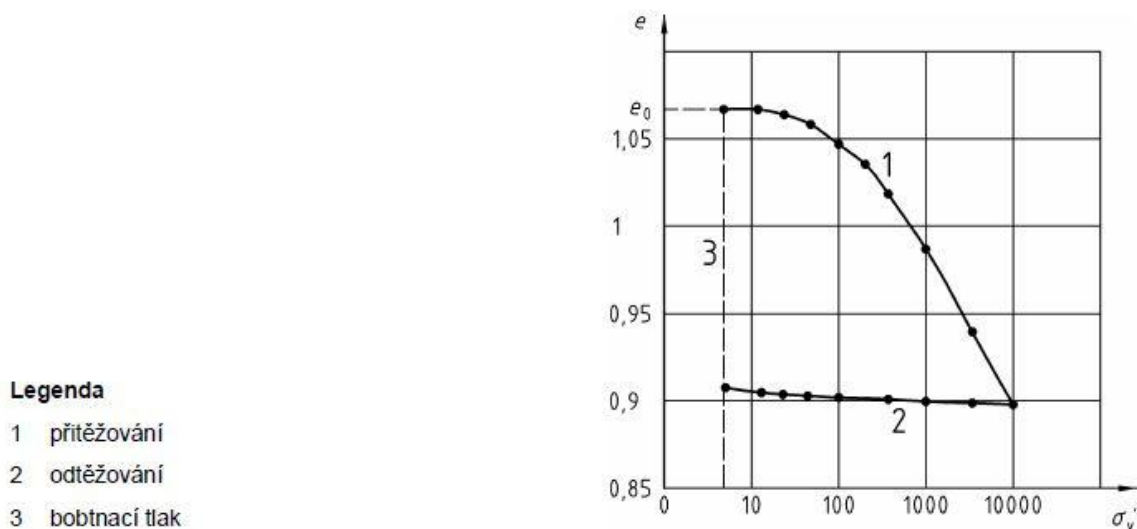
Cílem práce je proto kromě shrnutí informací o výskytu zemin, které vykazují významné objemové změny, a které tak ohrožují stavební konstrukce, také popsat základní principy bobtnání a objasnění jednotlivých projevů či „typů“ bobtnání zemin. V textu jsou stručně popsány metody měření bobtnacích tlaků, metody rozpoznání potenciálně bobtnavých zemin, vlastnosti, které ovlivňují bobtnání zemin, i konkrétní popis lokalit, kde se bobtnání zemin objevilo a způsobilo komplikace.

2. BOBTNÁNÍ

Termín bobtnání lze užít pro proces, kdy jemnozrnná zemina nasává vodu ze svého okolí, tj. narůstá její vlhkost a zvětšuje se objem. Děj pokračuje do doby, než zemina dosáhne rovnovážného stavu nebo je přísun vody omezen. Je důležité rozlišit jednotlivé typy bobtnání. K bobtnání jemnozrnné zeminy může dojít buď jen při dotaci vodou v přirozeném uložení, nebo při jejím odlehčení. Vedle těchto dvou bobtnacích vlivů, je zde ještě bobtnání, popisované Kontou (2004). Jedná se o bobtnání, které vyplývá z mineralogického složení dané zeminy a Konta ho rozděluje na vnitřně krystalické a vnější osmotické. Toto bobtnání, podrobněji popsané v kapitole 3.1.1.1, se projevuje, když se v zemině objevují některé ze skupiny jílových minerálů. Jednotlivá bobtnání jsou podrobněji popisována v následujících kapitolách.

2.1 Bobtnání vlivem odlehčení

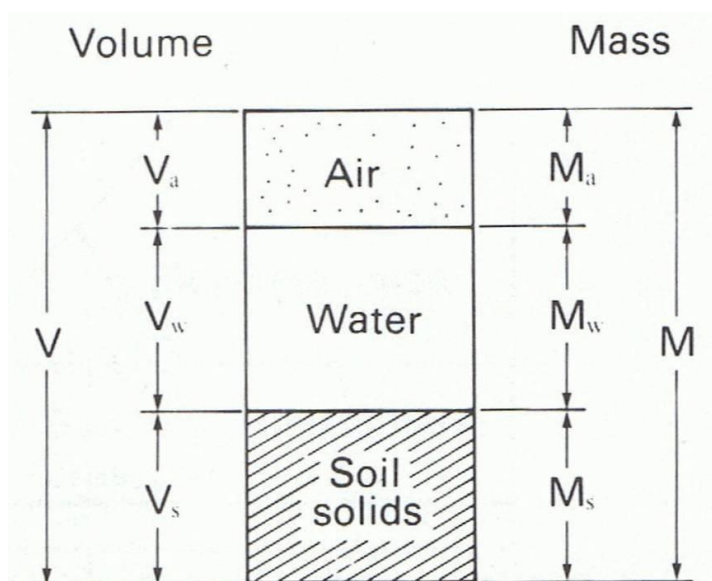
Bobtnání vlivem odlehčení definuje pro Českou republiku norma ČSN CEN ISO/TS 17892-5 takto: bobtnání (swelling) je expanze vlivem redukce efektivních napětí. Za touto definicí následuje ještě poznámka, že bobtnání zahrnuje jak zpětnou konsolidaci, tak zpětnou stlačitelnost, obr. 1. V procesu bobtnání vlivem odlehčení hraje důležitou roli nasycenost zeminy.



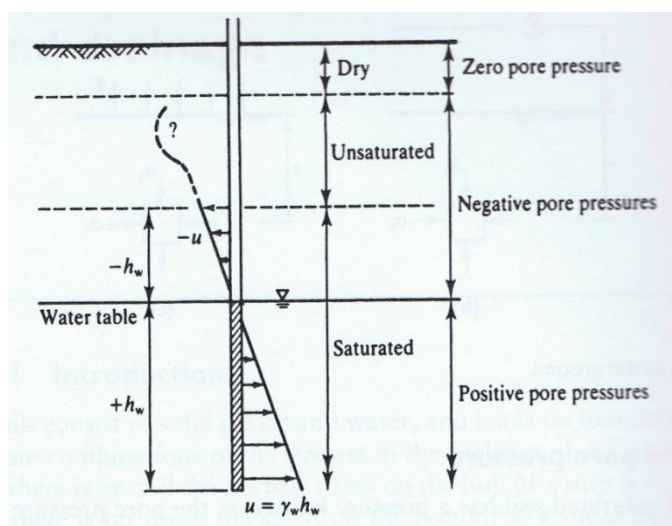
Obr. 1. Typický graf závislosti čísla pórovitosti e na svislém efektivním napětí σ_v' (ČSN CEN ISO/TS 17892-5, 2005)

2.1.1 Nenasycená zemina

Ve vysušené zemině jsou póry vyplněny vzduchem, v nasycené zemině jsou vyplněny vodou a v nenasycené zemině póry obsahují vodu a plyn, obvykle vzduch. Znamená to tedy, že vysušená zemina se skládá ze dvou fází, pevná látka (zrna zeminy) a plyn (vzduch). Nenasycená zemina je tvořena třemi fázemi, pevnou látkou, plynem a kapalinou (vodou). V zemině nasycené se vyskytují fáze dvě, pevná látka a kapalina. Schematické znázornění je znázorněno na obrázku obr. 2. Chování nenasycených zemin je velice složité a v současnosti není jasná teorie, která by adekvátně popisovala inženýrské chování nenasycených zemin (Atkinson, 2007). Na obrázku obr. 3, je znázorněný profil, ve kterém je naznačena hladina podzemní vody.



Obr. 2. fázový diagram pro nenasycenou zeminu (Fredlund and Rahardjo, 1993).



Obr. 3. Nasycená, nenasycená a vysušená zemina (Atkinson 2007).

Nasycená zemina se nachází pod hladinou podzemní vody a částečně i nad ní. Čárkovane je vyznačeno rozhraní mezi nenasycenou a nasycenou zeminou. Nad nenasycenou zeminou se ještě

nachází zemina vysušená. Na obrázku jsou znázorněny pórové tlaky, které jsou pod hladinou podzemní vody kladné, nad hladinou záporné a v zóně, kde se nachází vysušená zemina, jsou tyto tlaky nulové. Zeminy, které byly z počátku nasycené, se můžou stát nenasyčenými, klesne-li pórový tlak pod kritickou hodnotu a vzduch je schopný vstoupit do pórů. Nenasyčená zemina se může stát nasycenou, stoupne-li hladina podzemní vody.

2.1.2 Stupeň nasycení

Nasycenost zeminy se dá charakterizovat pomocí stupně nasycení, který je dán vztahem:

$$S_r = \frac{V_w}{V_w + V_a} \quad (1)$$

kde S_r je stupeň nasycení, V_w objem vody a V_a je objem vzduchu. $V_w + V_a = V_p$, kde V_p je objem pórů. Pro vysušenou zeminu ($V_w = 0$) $S_r = 0$ a pro nasycenou zeminu ($V_a = 0$) $S_r = 1$. Při nízkém stupni nasycení, tedy nízkém obsahu vody, se voda drží na kontaktech zrn a vytváří tak kapilární menisky, které drží zrna při sobě. V praxi se pohybují hodnoty stupně nasycení okolo 0,25-1. Stupeň nasycení lze částečně vyvodit z hodnoty sání s pro daný vzorek zeminy. Čím vyšší sání, tím nižší stupeň nasycení a naopak. Závislost S_r a s , která se nazývá referenční čára je důležitou charakteristikou zeminy (Fredlund and Rahardjo, 1993), je však nad rámec této práce.

2.1.3 Vlastnosti částečně nasycených zemin

Zákonitosti v chování neplastických středně expanzivních částečně nasycených zemin byly ustanoveny v průběhu druhé poloviny 20. století. Testy provedené ke stanovení těchto vlastností byly převážně oedometrické, v menším rozsahu triaxiální (trojosé) a krabicové zkoušky.

K popisu chování nenasyčených zemin se často používá redukované napětí a sání.

- redukované střední napětí – je definováno takto:

$$p = \sigma_m - u_a \quad (2)$$

kde p je přebytek hlavního středního napětí nad pórovým tlakem vzduchu u_a .

- (kapilární) sání – zvyšuje tuhost a pevnost zeminy a je definováno:

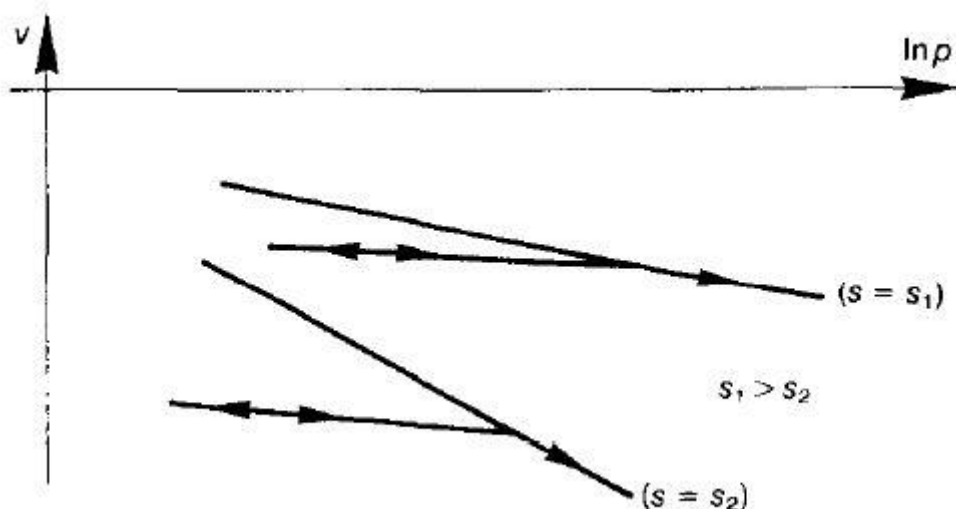
$$s = u_a - u_w \quad (3)$$

kde s je sání, u_a pórový tlak vzduchu a u_w je pórový tlak vody.

V procesu přírodního ukládání a zhutňování vznikají v zemině otevřené struktury, které redukují sání a pro určitý typ všesměrného napětí (střední hlavní napětí), mohou vyvolat nenávratné objemové změny (kolaps). Částečně nasycená zemina může při dotaci vodou expandovat nebo kolabovat. To závisí na všesměrném napětí. Pokud je malé, pak dojde k expanzi, pokud velké, zemina kolabuje.

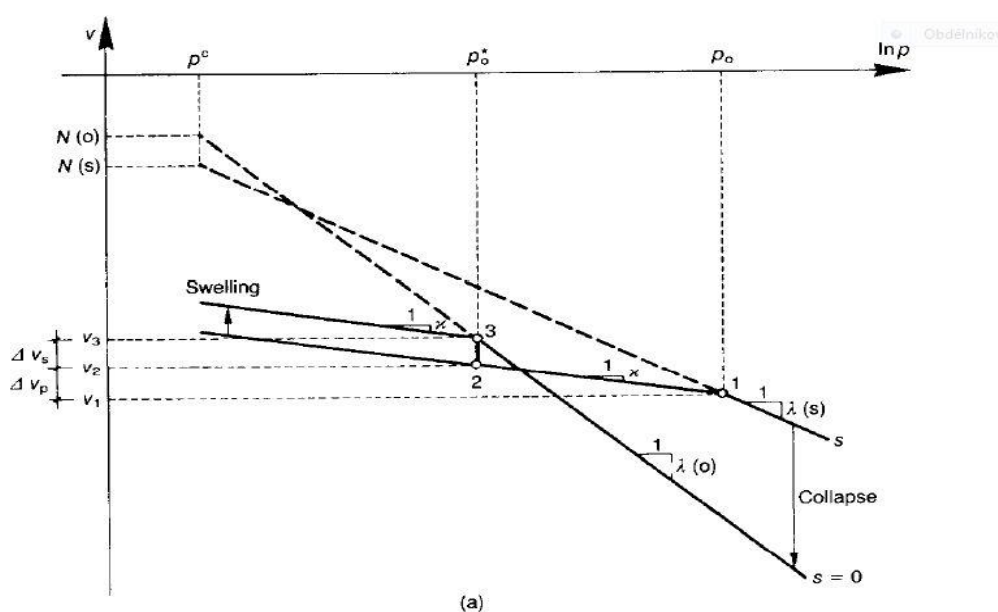
Na obr. 4 jsou ukázány dva vzorky s různou hodnotou sání, přičemž $s_1 > s_2$. Obrázek představuje závislost specifického objemu na redukovaném napětí v logaritmickém měřítku. Vzorky byly vystaveny vzrůstajícímu izotropnímu zatížení a následnému odlehčení. Znázorněné odlehčovací dráhy

jsou, jak je vidět na obrázku, u obou vzorků téměř rovnoběžné. Je patrné, že vzorek s vyšším stupněm nasycení má nižší stlačitelnost (Alonso et al., 1990).



Obr. 4. Závislost specifického objemu na redukovaném napětí (Alonso et al., 1990).

Obrázek obr. 5 ukazuje izotropní zatěžování dvou vzorků také s různou hodnotou sání, přičemž jedna je nulová, zemina je nasycená. Překonsolidační napětí, tedy bod 3, je pro nasycenou zeminu nižší, než v případě částečně nasycené, bod 1. Body 3 a 1 představují tzv. body zplastizování. Obrázek obr. 5 vystihuje zkušenost, že při větší napjatosti bude po zalití vzorek bobtnat. Pokud však zatížení přesáhne mezní hodnotu, pak při zalití vodou nastane kolaps nenasyčené zeminy a zemina se dostane do stavu zeminy nasycené. Autoři dále ukazují model pro nenasyčené zeminy, který popisuje bobtnání a kolaps. Pro jednoduché situace – zvedání základové půdy – je možno provádět analýzy na základě oedometrické zkoušky bez ohledu na nasycenost (Fedá, 1970).



Obr. 5. Závislost specifického objemu na redukovaném napětí (Alonso et al., 1990).

2.2 Bobtnání nenasycených zemin vlivem dotace vodou

Pokud je zemina v přirozeném uložení dotována vodou, bobtná. Velikost bobtnání opět závisí na nasycenosti zeminy (kapitola 2.1.1). Zemina s menší nasyceností má menší stupeň nasycení, menší vlhkost a tím pádem větší sání. Důležitou proměnnou v procesu je voda nebo obecně kapalina.

2.3 Smrštění

Mluvíme-li o bobtnání nenasycených zemin, je jasné, že musí existovat i proces opačný. Proces, při kterém zemina zmenšuje svůj objem a snižuje stupeň nasycení, se nazývá smrštění. Smrštění končí v době, kdy vlhkost zeminy klesne na mezní hodnotu vlhkosti na mezi smrštění nebo podmínky, které jinak vedou ke smrštění, se změní natolik, že proces ustane. Mitchell and Soga (2005) popisují, že smrštění jemnozrnných zemin je způsobeno pohyby částic vycházejících z tlaku pórové vody, který je vyvozen kapilárními menisky. Například pro dva vzorky jílu o stejné vlhkosti ale o různé struktuře částic platí, že vzorek, který je méně zhutnělý se bude více smršťovat.

2.4 Bobtnací tlak a potenciál

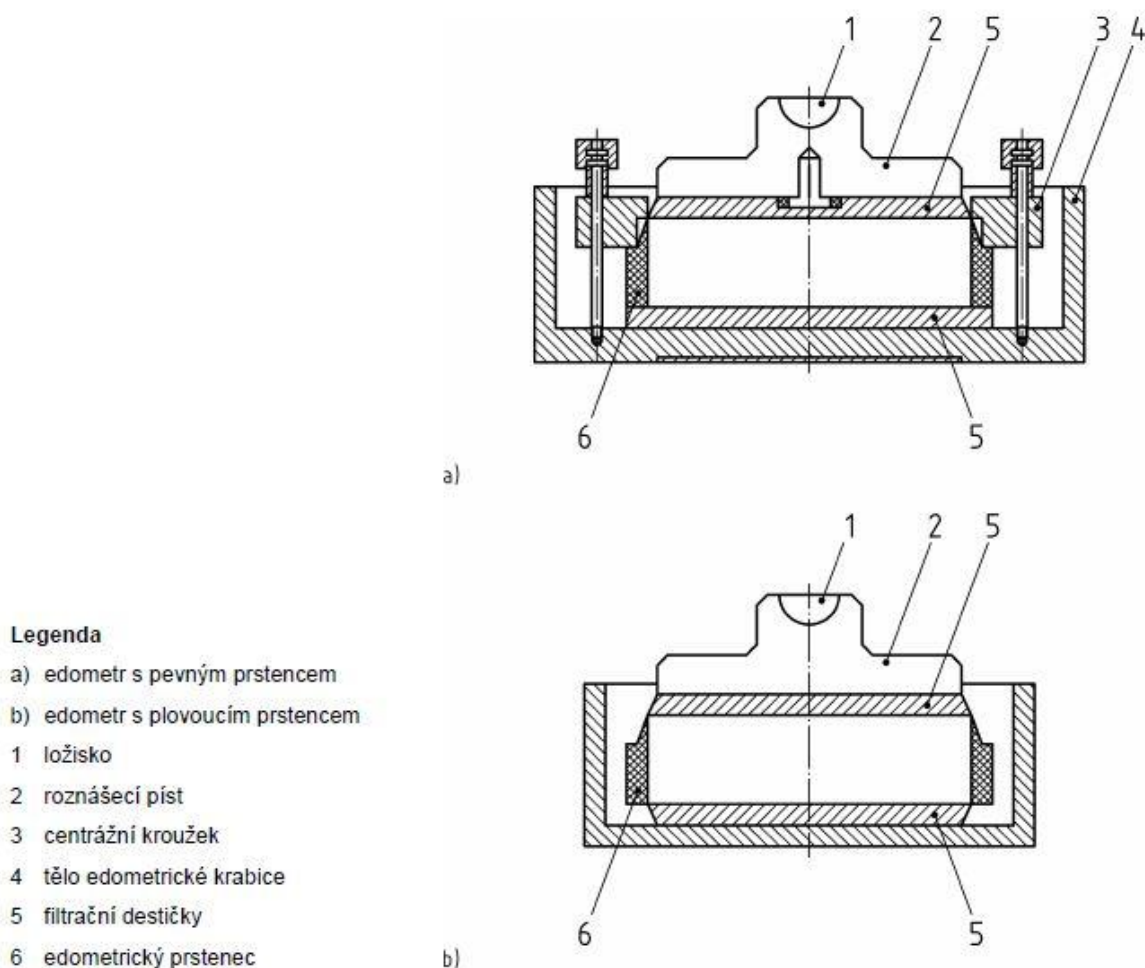
Bobtnací tlak je užitečný index pro určení potenciálního bobtnání zeminy. Lze jej definovat jako maximální sílu na jednotku plochy, která musí být aplikována na bobtnavou zeminu, aby bylo zabráněno zvětšení objemu. Bobtnací potenciál zeminy je poměr velikosti vzedmutí zeminy pro daný finální obsah vody a zatížení (Al-Rawas and Goosen, 2006). Pro zjištění těchto dvou parametrů jsou stanovené speciální zkoušky, které v České republice spadají pod normu ČSN CEN ISO/TS 17892-5. Tato technická specifikace je určena pro stanovení stlačitelnosti, bobtnacího tlaku a konsolidačních vlastností zemin. Válcový zkušební vzorek, kterému je zabráněno roztlačování do stran, podléhá diskrétnímu stupňovitému osovému přitěžování nebo odtěžování za drénovaných podmínek oběma podstavami. Hlavní parametry zjistitelné z oedometrické zkoušky jsou stlačitelnost a rychlost primární konsolidace zeminy. Lze získat i velikost překonsolidačního tlaku, rychlost sekundárního stlačování a bobtnací tlak.

2.4.1 Měření v oedometru

Počáteční obsah vody a číslo pórovitosti by měly odpovídat podmínkám in situ bezprostředně po odebrání. Norma ČSN CEN ISO/TS 17892-5 jasně předepisuje postup při oedometrické zkoušce. Oedometr se skládá z oedometrické krabice a tuhého válcového prstence, obr. 6. Průměr by měl být nejméně 35 mm, výška ne méně než 12 mm a poměr průměru k výšce ne méně než 2,5. Jak tělo, tak prstenec musí být vyrobeny z korozi-vzdorného materiálu. Zkouška by měla být prováděna na neporušených nasycených homogenních vzorcích.

2.4.2 Postup stanovení bobtnacího tlaku

Vzorek by měl být připraven v souladu s výše citovanou normou vytlačením z odběrného válce se stejným průměrem, jako má oedometrický prstenec, vytlačením z odběrného válce s větším průměrem než je průměr prstence, vyřezáním z neporušeného bloku vzorku, vyřezáváním z neporušeného vzorku získaného z vrtného jádra, nebo v případě, že nelze získat neporušený vzorek umělým zhutněním porušené zeminy. Po sestavení celého přístroje se přistupuje k zatěžování vzorku. Musí být stanoveno svislé napětí na zkušební vzorek, to se odvíjí od stupně konzistence zeminy. Zatěžování se provádí v zatěžovacích krocích, kterých bývá obvykle 4-6, přičemž při normálním postupu musí být každé další napětí dvojnásobkem předchozího. Pro potenciálně bobtnavé zeminy by mělo svislé napětí, při prvním zatěžovacím stupni, mít vyšší hodnotu než je bobtnací tlak. Případně zkušební vzorek nemusí být zalit do doby, kdy svislé napětí překročí bobtnací tlak. Nejvyšší svislé napětí má být značně větší než předpokládaná hodnota maximálního svislého napětí *in situ*.



Obr. 6. Všeobecné uspořádání klasických oedometrických krabic (ČSN CEN ISO/TS 17892-5).

2.5 Index plasticity, I_p

Index plasticity je definován:

$$I_p = w_L - w_p \quad (4)$$

kde w_p je vlhkost na mezi plasticity a w_L vlhkost na mezi tekutosti. Z indexu plasticity lze orientačně predikovat možný bobtnací potenciál, Tab. 1.

Bobtnací potenciál	Index plasticity
Nízký	0 - 15
Střední	10 - 35
Vysoký	20 - 55
Velmi vysoký	> 35

Tab. 1. Bobtnací potenciál v závislosti na indexu plasticity, Chen (1975).

2.6 Vlastnosti zeminy ovlivňující bobtnací-smršťovací potenciál

Mezi faktory, které tento potenciál ovlivňují, patří obsah jílových minerálů, chemismus vody, půdní sací tlak, plasticita, struktura, hustota za sucha. Tyto vlastnosti lze rozdělit na trvalé a stav zeminy.

2.6.1 Trvalé vlastnosti

- obsah jílových minerálů - z jílových minerálů, popsány v kapitole 3.2, které ovlivňují objemové změny, jsou to především montmorillonit a vermikulit (Mitchell, 1973, in Nelson and Miller, 1992).
- plasticita - plasticita slouží jako indikátor pro bobtnací potenciál. Obecně, zeminy, které projevují plastické chování a nepřekračují vlhkost na mezi tekutosti, mají vysoký bobtnavý, respektive smršťující potenciál.

2.6.2 Stav zeminy

- struktura - bobtnací potenciál lze předpokládat u zemin, které jsou určitým způsobem zhutnělé a kompaktní. Oproti tomu zeminy kypře a nekompaktní mají bobtnací potenciál menší (Johnson and Snethen, 1978, in Nelson and Miller 1992).
- hustota za sucha - vyšší hustoty obvykle indikují těsnější uspořádání částic, což může znamenat vyšší odpudivé síly mezi částicemi a větší bobtnací potenciál (Chen, 1975).
- půdní sací tlak – půdní sací tlak (sání, kapilární sání) je popsán v kapitole 2.1.3.

2.7 Vnější podmínky, které ovlivňují bobtnací-smršťovací potenciál

Vedle vlastností půdy, které ovlivňují bobtnací-smršťovací potenciál, jej také ovlivňují vnější podmínky, mezi které se řadí počáteční vlhkost, změny vlhkosti, klima, podzemní voda, drenáž a umělé zdroje vody, vegetace, permeabilita, teplota a tlaková kritéria.

- počáteční vlhkost - vysušené expanzivní zeminy budou mít vyšší afinitu pro vodu a vyšší sací tlak, než stejné zeminy s vyšším obsahem vody, pro které je hodnota sacího tlaku nižší. Na druhou stranu zeminy s vyšším obsahem vody, se budou snáze smršťovat a ztrácet vodu při vysychání, než zeminy s relativně nižším obsahem vody.
- změny vlhkosti - změny vlhkosti v aktivní zóně, blízko svrchních částí profilu, primárně vymezují bobtnání. V těchto vrstvách se budou vyskytovat největší objemové změny a změny vlhkosti (Johnson, 1969, in Nelson and Miller, 1992).
- klima - možnosti a změny srážek a evapotranspirace vysoce ovlivňují dosažitelnou vlhkost a míru sezonních změn vlhkosti. Největší sezonní změny postihují oblasti se semiaridním klimatem (Holland and Lawrence, 1980, in Nelson and Miller, 1992).
- podzemní voda - vysoká hladina podzemní vody a její fluktuace poskytují zdroj vlhkosti a přispívají k jejím změnám.
- vegetace - stromy, křoviny a traviny čerpají, pro potřebu transpirace půdní vlhkost a způsobují, že půdy, respektive zeminy, mají, v závislosti na druhu vegetace různou vlhkost.
- permeabilita - zeminy s vysokou permeabilitou (propustností), ovlivněnou také zejména prasklinami, dovolují rychlejší migraci vody a mají tím pádem vyšší bobtnací potenciál.
- teplota - narůstající teplota způsobuje, že se vlhkost dostává do chladnějších částí, jako například pod základy budov, silnice, atd. (Johnson and Stroman, 1976, in Nelson and Miller, 1992) Budoucí teplotní změny vedoucí ke globálnímu oteplování by mohly způsobit značné změny ve vlhkosti zemin.
- tlaková kritéria - do těchto kritérií se řadí účinky zatížení, které byly v minulosti, podmínky *in situ*, zatížení a půdní profil.
 - překonsolidovaná zemina je více expanzivní, bobtnavá, než tatáž zemina, se stejným číslem pórovitosti, normálně konsolidovaná. Bobtnací tlak může u zhutněných jíílů s časem narůstat, ale samotné bobtnání, pod lehkým zatížením, není ovlivněno.
 - počáteční napjatost v zemině musí být odhadnuta s cílem zhodnotit pravděpodobné důsledky zatížení zeminy a změny vlhkosti prostředí. Původní efektivní napětí může být zhruba určeno pomocí odběru vzorků a testování v laboratoři nebo mohou být měření a pozorování prováděny *in situ*.
 - velikost přetížení určuje hodnotu objemové změny, která nastane pro danou vlhkost a hustotu. Vnější zatížení způsobuje změny v rovnováze intergranulárních odpudivých sil a redukuje bobtnavost, (Holtz, 1959, in Nelson and Miller, 1992).

- půdní profil - v půdním profilu hraje důležitou roli tloušťka a umístění potenciálně bobtnavých vrstev. Největší předpoklad pro bobtnání mají půdní profily, které mají rozsáhlé pozice expanzivních jílu. Bobtnání naopak brání, když potenciálně bobtnavé vrstvy leží na skalním podloží v mělké hloubce nebo jsou tyto vrstvy překryty vrstvami, které nemají bobtnavý charakter.

3. BOBTVAVÉ ZEMINY

Jako bobtnavé, též expanzivní zeminy se běžně nazývají ty, které zvětšují svůj objem při dotaci vodou. Objemovým změnám podléhají všechny zeminy, neboť i nasycená hrubozrnná zemina (písek) při odlehčení (snížení středního napětí) zvětšuje svůj objem, bobtná. Jílovité zeminy, obsahující některé ze skupiny jílových minerálů (minerály schopné vázat vodu), mají vyšší bobtnací potenciál. Tyto minerály jsou popsány v dalších kapitolách. Při procesu dotace vodou, se tato dostává do pórů mezi jednotlivými zrny. Čím více vody je schopna zemina absorbovat, tím více se od sebe oddalují zrna a dochází k nárůstu bobtnacího tlaku zeminy. Jestliže tento tlak překročí hodnotu tlaku zatížení, pak zemina začne bobtnat. Tento proces ustává, když tlaky dosáhnou rovnováhy, nebo je omezena dotace vody. Expanze zemin o deset procent a více, jsou neobvyklé.

3.1 Jíl

Ze závěrů nomenklaturních komisí AIPEA (Association Internationale Pour l'Étude des Argiles) a CMS (Clay Mineral Society) vyplývá, že jíl je směsný přírodní materiál, primárně složený z jemně zrnitých minerálů, který je obecně plastický při přiměřeném obsahu vody a ztvdne po vysušení či vypálení. Vedle vrstevnatých fylosilikátů mohou být součástí jílu i jiné minerály, jako alofány, živce, zeolity, karbonáty či oxidy a hydroxidy železa a hliníku, a organická příměs. Veškeré tyto příměsi mohou, ale nemusí ovlivňovat jejich plasticitu, bobtnavost a tvrdnutí po vysušení (Weiss and Kužvart, 2005).

3.1.1 Interakce s vodou

Interakce jílu, respektive jílových minerálů s vodou má za příčinu tři hlavní jevy, plasticnost, iontovou výměnu a bobtnání. Voda může být jílovými minerály vázaná ve dvou formách – molekuly H_2O , které se váží v pórech mezi částicemi a jsou sorbované na povrchu částic, a hydroxylové skupiny OH^- , které jsou v obalech vyměnitelných kationtů a v mezivrstevních prostorech, mezivrstvích.

3.1.2 Bobtnání jílu

Podle Konty (2004) se jedná o technologický parametr, který lze rozdělit na dvě fáze, vnitřně krystalické a vnější, osmotické bobtnání. Oproti osmotickému bobtnání je vnitřně krystalické způsobeno hydratací vyměnitelných kationtů v jílovém minerálu a rozmístěním nábojů ve strukturní

mřížce. U osmotického bobtnání dochází k vázání molekul vody elektrostatickými silami různého původu, na kationty ve struktuře jílových minerálů.

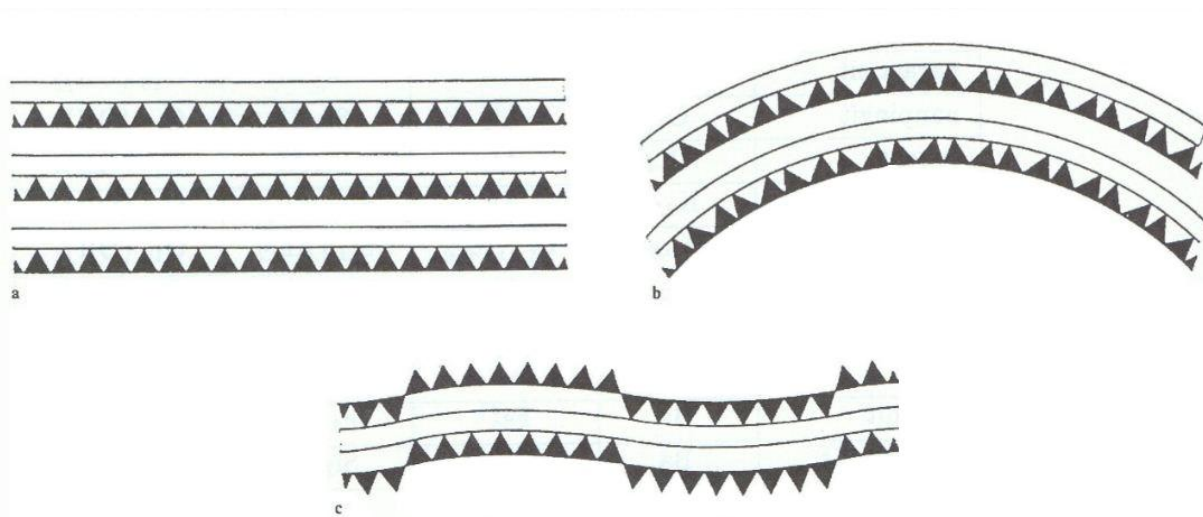
- vnitřně krystalické bobtnání - jak bylo řečeno v kapitole o bobtnání jílu, vychází vnitřně krystalické bobtnání z hydratace vyměnitelných kationtů. Tyto kationty odnímají během své hydratace molekuly vody z daného prostředí a tím vyrovnávají náboj na elektrostaticky nenasycené trojsíťové vrstvě. Tato fáze bobtnání je velice dobře popsitelná pomocí rentgenové difrakce. Jílové minerály skupiny smektitů a vermikulitu představují minerální druhy, pro něž je krystalické bobtnání charakteristické.
- vnější, osmotické bobtnání - při této fázi dochází k bobtnání, existuje-li velký rozdíl mezi koncentrací iontu sorbovaného k povrchu jílového minerálu a koncentrací téhož iontu v okolní pórové vodě. Kationty přitahující molekuly vody během osmotického bobtnání jsou drženy na povrchu jílového minerálu elektrostatickými silami, jejichž hlavním zdrojem jsou nábojově nenasycené tetraedry kyslíků obsazené trojmocnými kationty. Dále to mohou být přerušené vazby na okrajích strukturních vrstev jednotek. Nejmenší význam mají kationty nahrazující vodíky hydroxylů vystavených na některých aniontových bazálních rovinách.

3.2 Jílové minerály

Jílové minerály jsou minerály vzniklé druhotně, při chemickém zvětrávání matečné horniny. Mezi jílové minerály řadíme křemičitany s vrstevnatou strukturou, tzv. fylosilikáty, které se řadí do skupiny silikátových minerálů, dále sem patří například minerály skupiny alofánu, některé hydroxidy, oxo-hydroxidy a oxidy. Jílové minerály představují hlavní součásti jílu a jsou nositeli typických vlastností, se kterými se u jílu setkáváme, plasticita, sorpční schopnosti, bobtnavost a jiné (Konta, 1957).

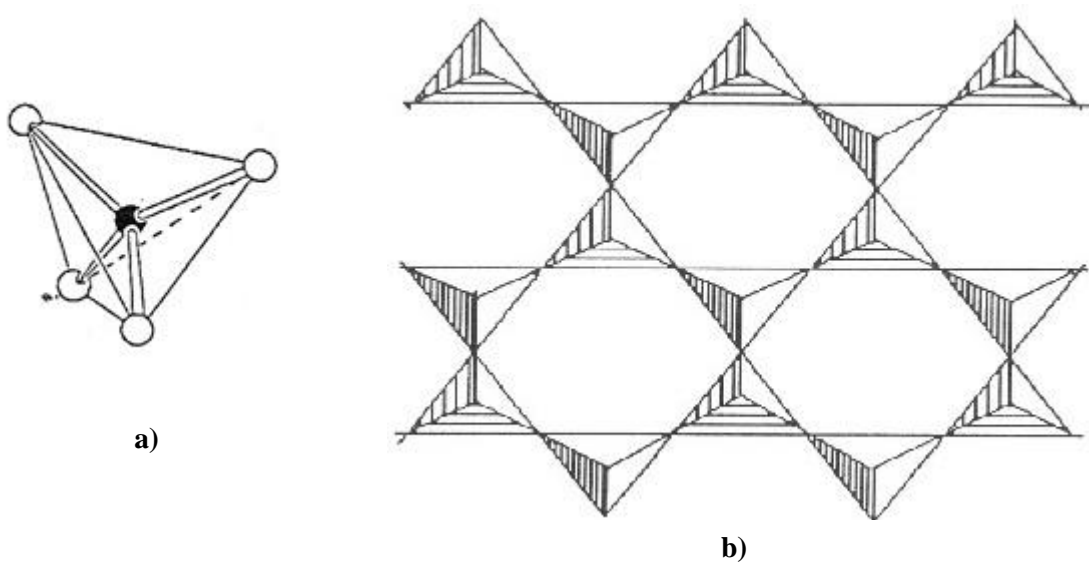
3.2.1 Fylosilikáty

Jejich základní stavební jednotku tvoří síť tetraedrů (T) $[XO_4]^{m-}$, kde X označuje centrální kationt, který je většinou obsazen Si^{4+} , méně často Al^{3+} , Fe^{3+} , Ge^{4+} . Vedle tetraedrů jsou to dále oktaedry (O) $[MA_6]^{n-}$, ve kterých M představuje centrální kationt zastoupený Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Ca^{2+} , Li^{+} , a A označuje anionty O^{2-} , OH^{-} a F^{-} . Z pohledu vrstevnatosti můžeme fylosilikáty rozdělit na planární, kdy jsou síť tetraedrů rovinné (slídy, kaolinit), a neplanární ve kterých jsou vrstvy ohnuté, nebo je periodicitu vrstev narušována, obr. 7.



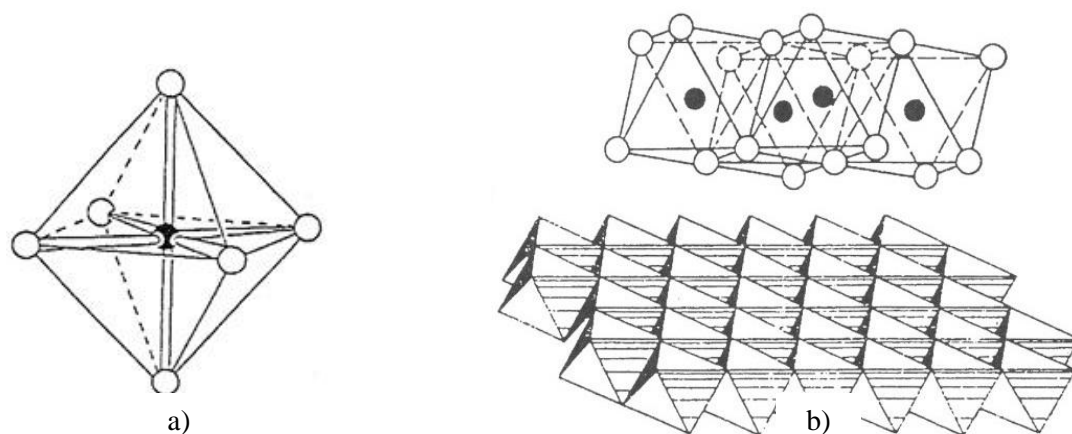
Obr. 7. Schematické zobrazení možných forem 1:1 vrstev: a) planární, b) cylindrické, c) modulované, kde jako modulovaná komponenta vystupuje tetraedrická síť, (Weiss and Kužvart 2005).

- Struktura fylosilikátů – jak je znázorněno na Obr. 8, a), je tetraedr složen z jednoho centrálního kationtu obklopeného čtyřmi anionty, které se pak dále napojují na ostatní tetraedry tak, že každý jeden vrchol (aniont) je napojen na sousední a tak tvoří hexagonální síť (Obr. 8, b)).



Obr. 8. a) schéma tetraedru (černě centrální kationt), b) tetraedrická síť, hexagonální symetrie (Weiss and Kužvart, 2005)

Oktaedry jsou rovněž tvořeny centrální kationtem, ale ten obklopují ne čtyři, ale šest aniontů (Obr. 9), které se spojují s okolními oktaedry jednak pomocí vrcholů (aniontů), ale sdílejí také polovinu hran.



Obr. 9. a) schéma oktaedru (černě centrální kationt), b) schéma ukazující propojení oktaedrů (Weiss and Kužvart, 2005)

3.2.2 Rozdělení jílových minerálů

Vrstvy jílových minerálů jsou složeny ze dvou, tří nebo čtyř sítí, které jsou tvořeny tetraedry a oktaedry. Jílové minerály jsou, podle Konty (1994), rozděleny do sedmi skupin (Tab. 2). Rozhoduje o tom poměr tetraedrů k oktaedrům, případné výměny kationtů mezi těmito vrstvami a náboje strukturních vrstev (permanentní náboj), který je ovlivněn právě kationty.

Skupina	T:O(:O)	náboj
Kaolinitu a serpentinu	1:1	0
Slíd	2:1	≤ 2
Vermikulitu	2:1	1,2-1,8
Smektitů	2:1	0,5-1,2
Pyrofylitu a mastku	2:1	0
Chloritů	2:1:1	1,1-3,3
Palygorskitu a sepiolitu	vrstevnatě vláknitá struktura	-

Tab. 2. Skupiny jílových minerálů (Konta, 1994).

3.2.3 Náboj

V tetraedrických a oktaedrických sítích dochází k substitucím kationtů, které vedou k vytvoření permanentního (vrstevného, strukturního) náboje. Ten souvisí s přítomností mezivrstevního prostoru (mezivrství). Mezivrství je prostor, ve kterém se vyskytují ionty, nejčastěji Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , které zachovávají elektroneutralitu, tedy neutrální náboj. Pokud se na vrstvě vyskytuje permanentní náboj, pak existuje mezivrstevní prostor. Poruchy ve vazbách mezi ionty na hranách krystalu pak vytvářejí

náboj variabilní. Permanentní a variabilní náboj společně tvoří náboj celkový. S klesajícím permanentním nábojem od 2 k 0,5 se zvyšuje bobtnavost u fylosilikátu typu 2:1. To znamená, že bobtnavost je nulová u minerálů skupiny slíd, roste u vermikulitů a nejvyšších hodnot dosahuje u smektitů.

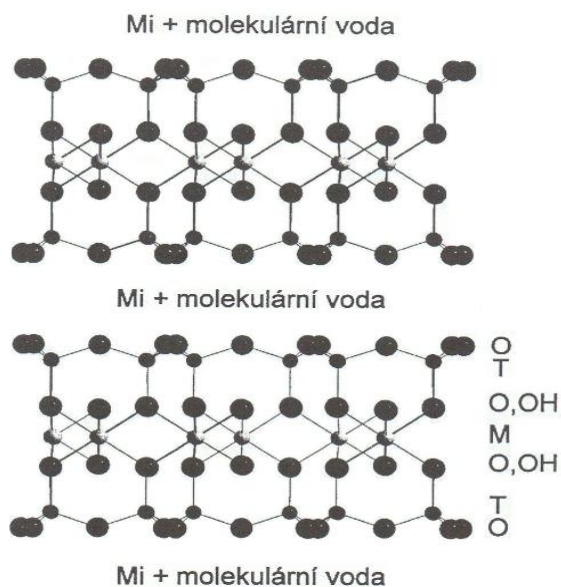
3.2.4 Obecné vlastnosti jílových minerálů

Díky rozměrům jednotlivých krystalů a vrstevní struktuře mají jílové minerály řadu unikátních vlastností, mezi něž se řadí zejména:

- Sorpční schopnost a iontová výměna – vyměnitelné kationty (v přírodě nejčastěji K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , H_3O^+ , NH_4^+) se na struktury jílových fylosilikátů váží na přerušené nenasyčené vazby na povrchu, zejména na hranách částic (adsorpce), elektrostaticky na tzv. vnitřní povrch částic, tj. do mezivrstevních prostor na přeby-tečné nenasyčené náboje vrstevního komplexu (absorpce).
- Schopnost vázat vodu – tato vlastnost je popsána v kapitole 3.1.1.
- Změny při zahřívání – při zahřívání jílových minerálů dochází nejprve k dehydrataci, tedy ztrátě sorbovaných molekul H_2O a následně k dehydroxylaci, ztrátě OH^- . Dosáhnou-li teploty hodnot kolem 500-800 °C, dojde k destrukci fylosilikátové struktury a u teplot přesahujících 900 °C vznikají novotvořené fáze, zejména mullit, sklo, cristobalit, a dochází ke slinutí. Tyto změny struktury a vznik nových fází mají význam pro keramickou technologii, výrobu žáruvzdorných hmot apod. U některých jílových minerálů, například vermikulitu, dochází při zahřívání ke zvětšování objemu, tzv. termická expanze.

3.3 Minerály skupiny smektitů

Minerály z této skupiny jsou předmětem zkoumání mnoha prací již od 30. let 20. století, kdy v roce 1933 navrhli Hofman *et al.* in Weiss and Kužvart (2005) představu o jejich vrstevnaté struktuře. Smektity se vyskytují v podobě malých krystalků s často porušenou strukturou, což je hlavní důvod, proč jejich struktura nebyla jednoznačně vyřešena. Na obrázku obr. 10 je znázorněna struktura, která vychází z všeobecného předpokladu, že minerály skupiny smektitů mají strukturu složenou z dioktaedrických nebo trioktaedrických vrstev 2:1, přičemž mezi těmito vrstvami jsou vyměnitelné kationty společně s jejich hydratačními obaly, které jsou tvořeny molekulární vodou (Weiss and Kužvart, 2005).



Obr. 10, Schematické zobrazení struktury dioktaedrického smektitu (pohled podél osy X). Pozice Kationtů v Oktaedrické síti jsou označeny *M*, v tetraedrické síti *T* a mezivrstevní kationty jsou označeny *Mi* (Weiss and Kužvart, 2005).

3.3.1 Dioktaedrické smektity

Do této podskupiny smektitů se řadí minerály montmorillonit, beidellit, nontronit a volkonskoit. Z těchto minerálů je z hlediska bobtnání zemin nejdůležitější minerál montmorillonit.

- montmorillonit – jedna z hlavních charakteristik je, že tetraedrické pozice nevykazují žádnou nebo jen velmi malou míru substituce Al^{3+} za Si^{4+} . Náboj vrstvy 2:1, který je důležitý z hlediska schopnosti vázat vodu, je vyvolán především oktaedrickou substitucí. Montmorillonity jsou typické proměnlivostí v chemickém složení. Někteří autoři rozdělují montmorillonity na několik typů, které bývají někdy označovány podle názvů lokalit. Mezi nejčastěji uváděné patří typ Wyoming s nízkým nábojem, typ Chambers se středním nábojem, typ Otay s vysokým nábojem a typ Fe-montmorillonitu s vysokým obsahem železa (Weiss and Kužvart, 2005).

3.3.2 Trioktaedrické smektity

Podle Güvena (1988) in Weiss and Kužvart (2005) lze trioktaedrické smektity rozdělit do tří skupin:

- smektity s dominantním Mg^{2+} v oktaedrech, u nichž je náboj vrstvy 2:1 vyvolán především oktaedrickou substitucí. Tato skupina je zastoupena řadou hektorit – stevensit.
- smektity u nichž dominují v centrálních pozicích oktaedrů kationty jako Ni^{2+} , Co^{2+} , Zn^{2+} nebo Mn^{2+} . Pro minerály z této skupiny se používá označení sauconit.
- smektity s Mg^{2+} a Fe^{2+} , jako dominantními oktaedrickými kationty. Náboje vrstev 2:1 je vyvolán tetraedrickou substitucí.

4. ROZPOZNÁNÍ POTENCIÁLNĚ BOBTNAVÝCH ZEMIN

Chen (1975) uvádí, že k určení potenciálně bobtnavých zemin, existují tři různé skupiny metod.

4.1 Mineralogická identifikace

Tato metoda může být užitečná při vyhodnocování materiálů, ale při zabývání se přírodními zeminami již není dostačující. Metody mineralogické identifikace, pro použití při laboratorních výzkumech základních vlastností jílu, jsou vhodné, ale neekonomické a nepraktické pro potřeby geotechniků a inženýrských geologů. Mineralogické složení má důležitý vliv na potenciální bobtnavost zemin. Negativní elektrické náboje na povrchu jílových minerálů, pevnost mezivrstevního prostoru a schopnost výměny kationtů, to vše přispívá a má vliv na bobtnání zemin. Proto je studium mineralogického složení tak důležité pro popis bobtnavého potenciálu a samotných zemin. Pět základních technik, které mohou být použity pro mineralogickou identifikaci, jsou:

- rentgenová difrakce – difrakce (ohyb) rentgenového záření, se využívá pro studium krystalových struktur. K difrakci dochází na elektronech obsažených v atomových obalech jednotlivých struktur. Pro téměř každý minerál tak existují unikátní difrakční hodnoty. Bohužel tato metoda není pro analýzu jílových minerálů příliš vhodná.
- diferenciální termická analýza – tato analýza sleduje změny minerálů při měnící se teplotě. Použití této metody pro určení potenciálně expanzivních zemin není vždy přesné.
- barevná adsorpce – barvivo a jiná činidla, která se projevují charakteristickými barvami při adsorpci minerálem, se používají k identifikování jílových minerálů. Tento relativně jednoduchý test nemá však takové uplatnění jako například rentgenová difrakce a termická analýza, ale je užitečná pro určování jílových minerálů.
- chemická analýza – běžně bývá používána jako doplňková k jiným metodám, jako k rentgenové difrakci, pro identifikaci minerálů. Například u některých jílových minerálů, montmorillonit, může chemická analýza ukázat původ a umístění náboje v mřížce. Běžně se postupuje tak, že napráškovaný vzorek se rozpustí různými kyselinami do roztoku a poté probíhá následná analýza jednotlivých prvků, respektive jejich oxidů.
- zkoumání za pomoci elektronového mikroskopu – elektronový mikroskop umožňuje přímé pozorování jílových, ale i jiných minerálů. Při použití rentgenové difrakce a termální analýzy můžeme dostat stejné výsledky pro dva různé jílové minerály. Ravina (1973) zjistil, při rozsáhlé studii za pomoci elektronového mikroskopu, že neexpanzivní jílové minerály jsou tvořeny plochými, poměrně tlustými destičkami, zatímco expanzivní minerály jsou složené ze zvlněných a hrbolatých destiček.

4.2 Skupina metod zahrnujících nepřímé metody měření

- metoda oddělených prvků – jedná se o jednoduché testy půdních vlastností pro zjištění potenciální bobtnavosti.

- Atterbergovy meze – Holtz and Gibbs (1956) in Chen (1975) ukázali, že index plasticity a vlhkost na mezi tekutosti jsou užitečná vodítka pro určení bobtnacího potenciálu. Oproti tomu Seed, et al (1962) in Chen (1975) uvedli, že pro určení bobtnacího potenciálu, většiny bobtnavých zemin, předběžně stačí pouze určení indexu plasticity. Bobtnací potenciál je definovaný jako procentuelní bobtnání nasyceného vzorku, který je laterálně ohraničen, při zatížení 1 psi , po zpevnění na maximální hustotu za optimální vlhkosti podle AASHO normy pro test zhutnění. V přepočtu jednotek to znamená $6,8948 \text{ kPa}$. Z této definice sestavili tři posledně jmenovaní autoři následující vztah, podle nějž se dá orientačně vypočítat bobtnací potenciál:

$$S = 60 \times K \times I_p^{2,44} \quad (5)$$

kde S je bobtnací potenciál a $K=3,6 \cdot 10^{-5}$ je konstantou.

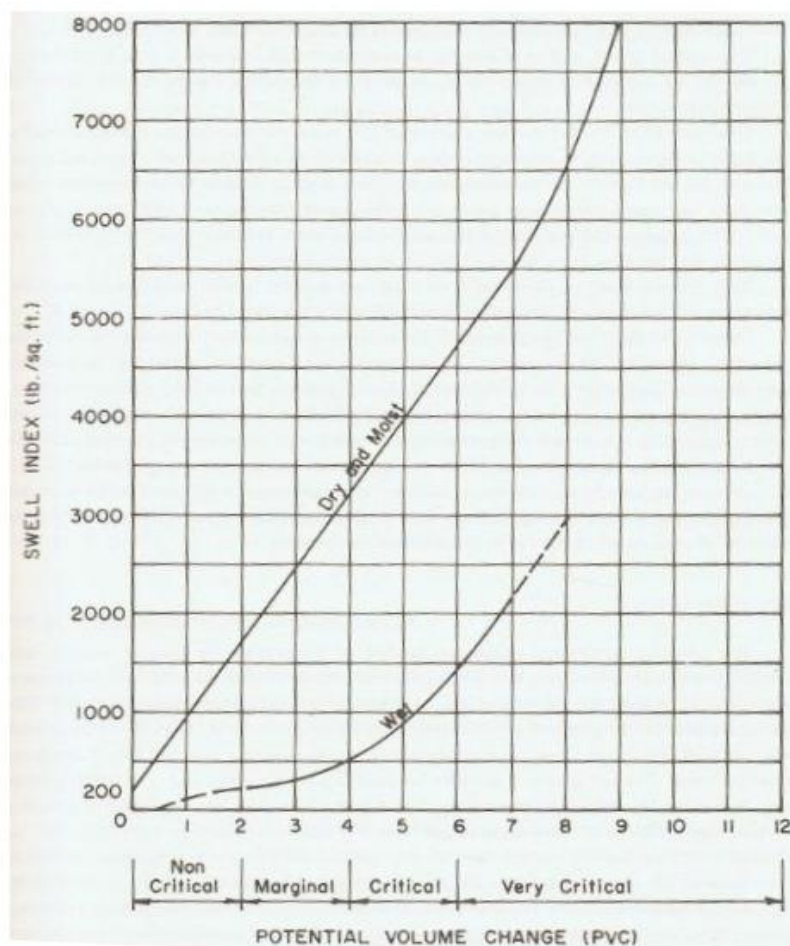
Předchozí rovnice se však dá použít pouze na zeminy, obsahující 8 - 65% jílu a vypočtená hodnota může mít odchylku 33% od laboratorních měření.

- lineární smrštění – předpoklad bobtnacího potenciálu souvisí s opačnou vlastností, tedy smrštěním. Teorie předpokládala přímou úměru mezi smrštěním a bobtnáním, avšak výzkum ukázal, že tomu tak není. Tedy velikost smrštění zeminy neodpovídá jejímu bobtnacímu potenciálu.

V České republice se pro smršťování zemin používá norma ČSN 72 1019. Tato norma určuje způsob laboratorního stanovení objemového smršťování soudržných zemin. Platí pro vyšetřování zemin ke stavebním účelům a vztahuje se na všechny jemnozrnné soudržné zeminy v přirozeném uložení, zhutněné nebo laboratorně připravené s jednoznačně definovaným počátečním stavem.

- volné bobtnání – tyto testy probíhají tak, že vzorek zeminy o známém objemu je umístěn do nádoby s vodou a zaznamenávají se jeho objemové změny. Rozdíl mezi finálním a počátečním objemem, vyjádřený jako procento počátečního objemu, je hodnota volného bobtnání.
 - obsah koloidních částic – zrnitostní charakteristika jílu má vliv na bobtnací potenciál, zejména pak obsah koloidních částic.
- metoda nepřímých měření
 - PVC – T. W. Lambe (1960) in Chen (1975), pod záštitou Federal Housing Administration, stanovil metodu potenciální změny objemu, potential volume change (PVC). Je určeno přetvoření vzorku. Nejprve je vzorek stlačen v pevném prstencovém konsolidometru (oedometru) silou $55000 \text{ ft/lbs per cu/ft}$, foot pound per cubic foot,

přepočteno cca 2,63 MPa. Poté je vyvinut počáteční tlak 200 psi, přepočteno cca 1,38 MPa, a do vzorku je přidána voda, při částečném zamezení vertikálních deformací pomocí siloměru. Čtení siloměru se provádí po dvě hodiny. Potom je přepočteno na tlak a je označeno jako Swell Index, bobtnací index. Na obrázku obr. 11 je ukázáno, jak může být bobtnací index převeden na potenciální změnu objemu.



Obr. 11. Bobtnací index (swell index) v závislosti na potenciálních objemových změnách.

- půdní sací tlak – viz kapitola 2.1.3

4.3 Metoda přímých měření

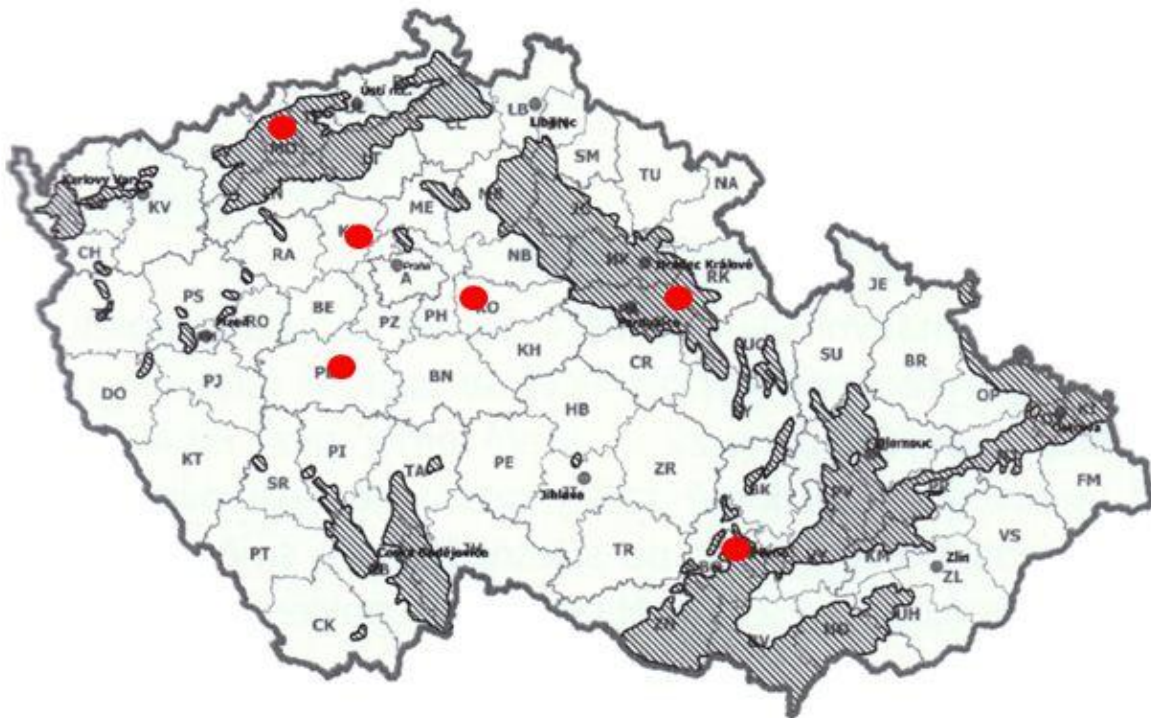
Přímého měření bobtnavých zemin je dosaženo za pomoci jedno-dimenzionálního konsolidometru, oedometru. Toto zařízení poskytuje jednoduchou a přesnou metodu měření bobtnacího potenciálu při různých podmínkách. Při této metodě je potřeba dbát na tyto proměnné hodnoty:

- stav vzorku – pro neporušený vzorek by měl být zahrnut jeho stav, metody odběru a historie zatížení. Porušený vzorek zahrnuje formu zhutnění, podmínky před a po zhutnění a finální hustotu.

- vlhkost – čím nižší počáteční vlhkost, tím vyšší bobtnání. Počáteční vlhkost je závislá na:
 - doba, po kterou je vzorek umístěný v prstenu před namočením,
 - výpar v době, kdy je vzorek umístěný v prstenci,
 - teplota a vlhkost v laboratoři.
- zatížení – zvyšování aplikovaného zatížení snižuje bobtnání.
- čas – čas po, který je prováděno laboratorní měření je velice důležitou proměnnou.

5. BOBTNAVÉ ZEMINY ČESKÉ REPUBLIKY

Co se týče rozšíření bobtnavých zemin (bobtnavé zeminy z hlediska minerálního složení) v České republice je jejich výskyt vázán na oblasti pánví. Jedná se o oblast severočeských pánví (chebská, sokolovská, žatecká, mostecká a Doupovské hory), Česká křídlová tabule, plzeňská pánev, jihočeské pánve, oblast karpatské předhlubně na jihovýchodní Moravě. Mimo tyto hlavní oblasti se bobtnavé zeminy v České republice vyskytují v lokálním měřítku téměř na celém našem území. Zejména se jedná o tercierní a kvartérní uloženiny jílovitého charakteru. Oblasti s výskytem objemově nestabilních zemin jsou znázorněny na obrázku obr. 12 (červené body na obrázku znázorňují lokality bližšího zájmu, které jsou popsány v následujících kapitolách).



Obr. 12. Oblasti s výskytem objemově nestabilních zemin, znázorněny šrafováním (Seyček et al., 2005).

5.2 Problémy způsobené bobtnáním zemin v ČR

Jak již bylo řečeno, bobtnání zemin způsobuje porušení budov, klesání, či zvedání základů, nadzvedávání silnic, destrukci tunelů a řadu dalších negativních vlivů, které jsou vyvolány tímto geohazardem. V České republice však tato problematika není příliš významná a tak jí není věnováno tolik pozornosti. V následující kapitole je popsáno několik případů, kdy bylo prokázáno nebo není jiného vysvětlení, že za příčinou vyvolání problému stály bobtnací vlivy zemin.

5.2.1 Tunel Třebovice

V železničním úseku Třebovice-Rudoltice, který se řadí mezi nejsložitější geotechnické stavby v České republice, způsobilý problémy vysoce bobtnavé a plastické miocénní jíly. Z důvodu působení těchto jílu došlo k destrukci Třebovického tunelu, zbudovaného v letech 1842-1845. Při ražbě tunelu došlo k narušení okolního horninového prostředí a jíly, které obsahovaly v některých částech zvodnělé písky, začínaly bobtnat. Vyvolané bobtnací tlaky negativně ovlivňovaly dočasnou obezdívku tunelu a docházelo k častým destrukcím pažení. Přes všechny potíže byl Třebovický tunel uveden do provozu v roce 1845. Zanedlouho po dokončení stavby se vyskytovaly častější a vážnější závady a tak byl tunel roku 1866 uzavřen a trasa vedena po povrchu. V polovině roku 1932 byly dokončeny opravy, které zahrnovaly vložení nové tunelové trouby. Při této rekonstrukci bylo zjištěno rozsáhlé zavalení tunelu a několik propadlin. Po těchto opravách sloužil tunel jako jednokolejový až do roku 2005, kdy jím projel poslední vlak. Oblast Třebovického tunelu se nachází v miocénní výplni Ústecko-Česko-třebovického příkopu. Mocnosti miocénní výplně dosahují až 170 m. Z rozborů vyplynulo, že v místě ražby tunelu se vyskytují hlavně jíly s převážným zastoupením illitu. Tyto jílové minerály dominují nad kaolinitem chloritem a montmorillonitem, které jsou proměnlivě vápnité. Tyto miocénní jíly, mající velmi vysokou plasticitu s $w_L = 70$ až 90% a extrémně vysokou plasticitou, kde $w_L > 90\%$, byly předmětem rozsáhlého souboru laboratorních zkoušek, které si kladly za cíl ujistit jejich fyzikálně – mechanické vlastnosti (kapitola 5.3.3), (Kresta, Martince, 2006).

5.2.2 Kladno, budova banky

Budova Kladenské banky, byla postavena na podloží, které nebylo dostatečně prozkoumáno a po nějakém čase se zde, v podzemních garážích, objevovala vzdušná místa až o několik centimetrů. Nejdříve byly za příčiny těchto problémů označeny půdní sesuvy, poddolování území nebo tlak vody na stavební konstrukci. Ani jedno z tvrzení nebylo potvrzeno. Později se však objevila nová teorie o tom, že zde mohlo dojít k objemovým změnám podloží banky (Zámek, 2002a). Byly zde předpokládány kaoliniticko-ilitické slíny, které mohou dosahovat nižších hodnot bobtnacích tlaků. Při provedených průzkumných vrtech byly odebrány vzorky tmavošedých jílu. Z rozborů, které však nebyly zaměřeny na bobtnání zemin, bylo stanoveno, že šlo o jíly vysoce plastické a pevné konzistence. Pro zeminu těchto vlastností lze předpokládat konečný přírůstek výšky vrstvy bobtnající ze stavu vlhkosti na mezi smrštění do stavu vlhkosti dosažitelné volným bobtnáním asi 8 % (vychází

z hodnoty volného bobtnání kaoliniticko-ilitických jíílů, jak uvádí Feda (1970). K porovnání posloužila stavební jáma v blízkosti budovy banky. Odlehčení středu vrstvy zemin o mocnosti asi 5 m v oblasti blízké středu stavební jámy, kam již zbytkové zatížení od zemního tělesa nezasahovalo, o hodnotu asi 0,11 MPa vedlo ke zdvihu asi o 9 cm, tedy o 1,8 % výšky vrstvy (5 m). Uváží-li se hodnota volného bobtnání, 8 %, pak by maximální výška nabobtnání v podmínkách plného odlehčení a zvýšení vlhkosti zeminy z vlhkosti na mezi smrštění do vlhkosti, jaké bylo dosaženo po ukončení volného bobtnání této odlehčené vrstvy zeminy, činila asi 40 cm. Jestliže by zjištěná maximální hodnota nerovnosti podlahy, a to asi 9 cm, představovala jen důsledek zvedání, pak by i takto zjištěné zvednutí podlahy činilo jen 23 % zmíněného maximálního zvednutí. Výchozí vlhkost zeminy byla asi 25 %, tedy zřejmě vyšší, než by odpovídalo vlhkosti na mezi smrštění a zemina po nabobtnání nemohla zcela dosáhnout vlhkosti odpovídající volnému bobtnání, poněvadž zůstávala pod určitou tíhou nadloží. Mohlo dojít tedy jen ke zvýšení vlhkosti odpovídající odlehčení asi o zmíněných 0,11 MPa (Zámek, 2002a). U tohoto konkrétního případu je důležité vzít v úvahu materiálové vlastnosti podlahy, protože ta má svou pevnost a tuhost. Chování zeminy pod podlahou lze tedy pojmut jako něco mezi volným bobtnáním a měřením bobtnacího tlaku (oedometr).

Vydání tohoto článku vyvolalo diskusi, ve které Pešek et al. (2002) vyjádřili svůj nesouhlas s tvrzením, které publikoval Zámek (2002a). V článku s názvem „K příčinám poruch staveb v centru města Kladna“ se autoři odvolávají na to, že J. Zámek se nezúčastnil žádných průzkumných šetření a neměl přístup ke všem podkladům. Dále je zde uvedeno, že k objasnění problému nepřispěl a ten dále přetrvává. Na to reagoval Zámek (2002b), že prostřednictvím článku „Poznámky k příčinám poruch staveb v centru Kladna“, chtěl upozornit odbornou veřejnost na nebezpečí problému, který vyvolávají bobtnavé zeminy. Zmiňuje také, že bobtnání zemin je procesem dlouhodobým a nestálým a tudíž nařknutí Peškem et al. není zcela na místě.

Dle mého názoru je tvrzení Zámka (2002a,2002b) správné a vše nasvědčuje tomu, že poruchy v centru Kladna jsou způsobeny bobtnáním zemin vlivem odlehčení.

5.2.3 Příbram, zvedání kolejnic v uranovém dole

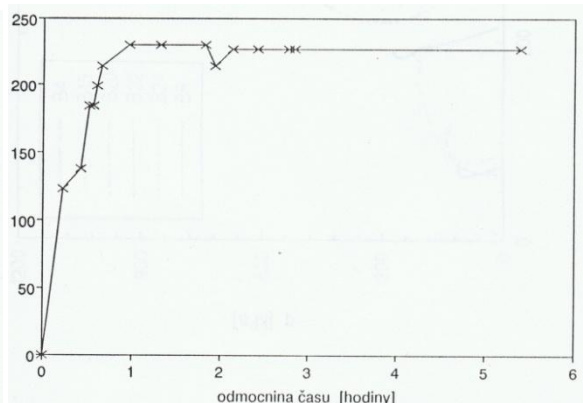
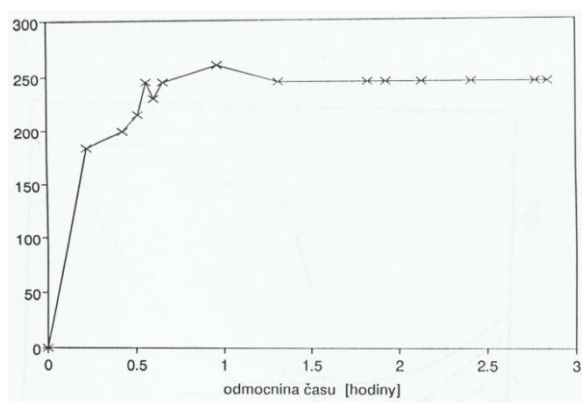
Tvrzení, že se v příbramských uranových dolech pravděpodobně projeví účinky bobtnání, mi bylo sděleno RNDr. J. Králem (2010, ústní sdělení), který zde toho času působil jako horník. Podle jeho slov zde docházelo opakovaně ke zvedání počvy a tím pádem kolejí, což znemožňovalo průjezd vozíků s hlušinou a vytěženým materiálem. Tento případ by se dal v menším měřítku přirovnat k problémům, které provázely vybudování Třebovického tunelu (5.2.1). V místě, kde se tento problém objevil, procházela štola tektonickou poruchou, kterou sem z vyšších partií pronikaly zeminy, či narušené horniny jílovitého charakteru. Štola se nacházela v hloubce kolem 450 m. Z toho lze usuzovat, že geostatické tlaky (vertikální napětí) dosahovaly hodnot okolo 4500 kPa. Vlivem odtěžení okolního materiálu došlo k odlehčení na 0 kPa a následnému neurčitému zatížení způsobené položením kolejí. Výsledné napětí zcela jistě nemohlo dosahovat tak vysokých hodnot jako původní

napětí geostatické. Otázkou zůstává, zdali šlo o bobtnání mineralogické (vnitřně krystalické a vnější osmotické) nebo o bobtnání vlivem odlehčení popisované v normě ČSN CEN ISO/TS 17892-5 a jestli šlo o zeminu nasycenou či nenasyčenou. V těchto hloubkách je výskyt podzemní vody, dá se říci, samozřejmý. Je obecně známým faktem, že veškerá důlní díla, kterým uranové doly v Příbrami bezpochyby jsou, se potýkají s problémem prosakování podzemních vod, která se sem dostává skrz drobné tektonické poruchy a praskliny v horninovém prostředí. Lze tedy bez dalších šetření předpokládat, že v tomto případě se jednalo o zeminu nasycenou. Dle mého názoru zde tedy docházelo ke zvedání počvy v důsledku odlehčení. Jelikož není známe bližší složení v místě přítomných jílu či hornin jílovitého charakteru, nelze zde hovořit o bobtnání vnitřně krystalickém a vnějším osmotickém.

5.3 Příklady lokalit s výskytem bobtnacích zemin

5.3.1 Brno, areál Boby sport

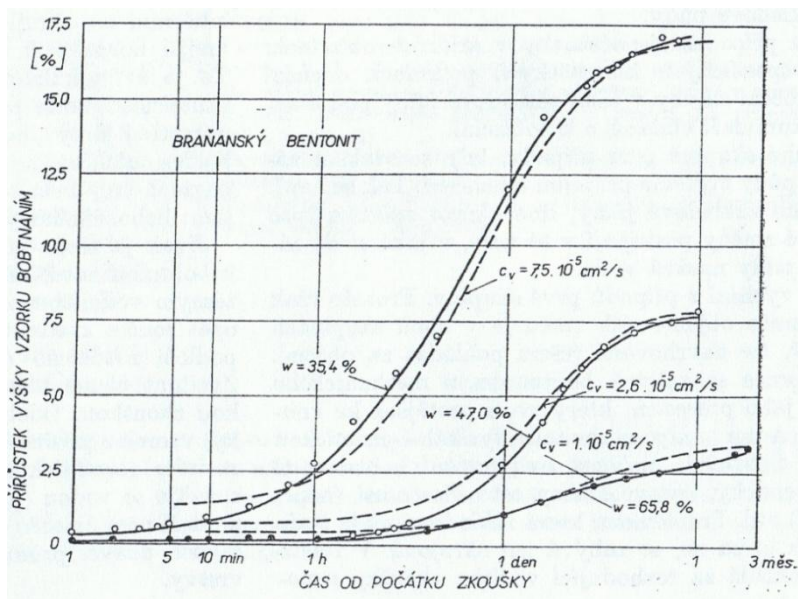
Brněnský sportovní areál byl budován v roce 1993. V rámci toho byla provedena měření mechanických vlastností základové půdy, které zahrnovaly i měření bobtnacích tlaků. Byl odebrán neporušený vzorek zeminy, který byl následně zatížen geostatickým napětím, odlehčen (na 92 a 46 kPa) a zalit vodou. Výsledky zkoušky jsou znázorněny na obrázcích obr. 13 a 14.



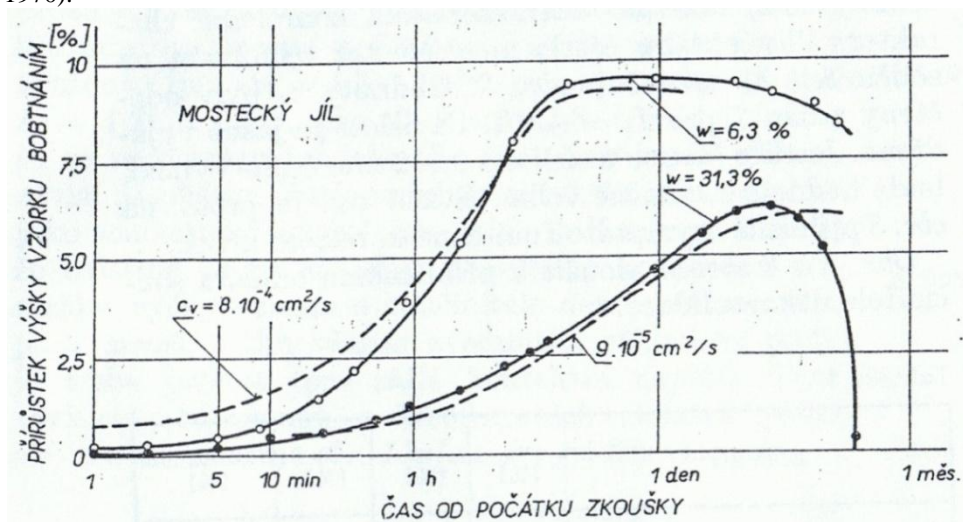
Obr. 13. Bobtnací tlaky 1 (Feda, Boháč, Herle, 1993) Obr.14. Bobtnací tlaky 2 (Feda, Boháč, Herle, 1993).

5.3.2 Braňany, Most, lom Brník

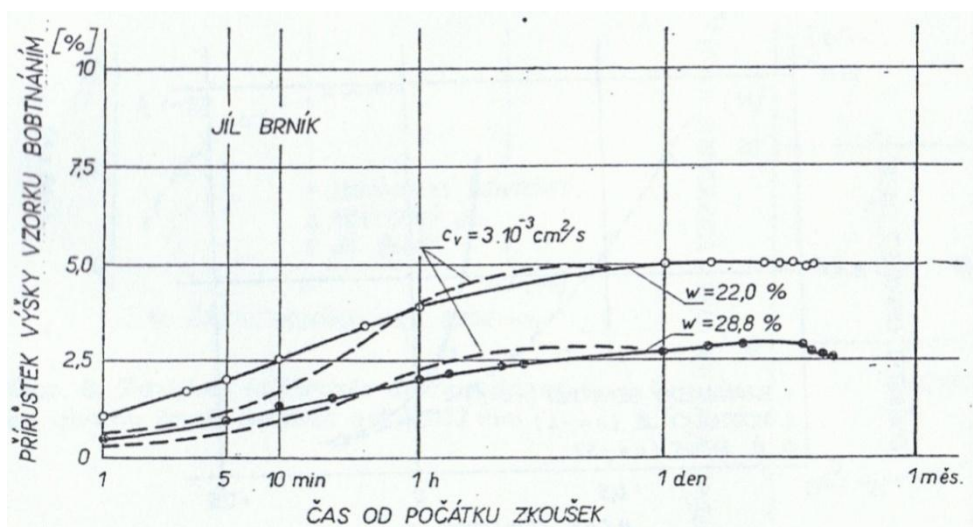
V rámci článku Zvedání soudržné základové půdy vlivem bobtnání, provedl Feda (1970) měření bobtnacích tlaků vzorků z lokalit Braňan (montmorillonitický jíl – přírodní bentonit), Mostu (iliticko – kaolinitický jíl) a lomu Brník (kaolinitický jíl). Výsledky jednotlivých zkoušek jsou znázorněny na obrázcích obr. 15, 16 a 17. Pro srovnání bobtnacích tlaků pro vzorek z lomu Brník jsem použil měření, které provedl Kazda (1961), ten měřil bobtnací tlaky na vzorku kaolinitického jílu neznámého původu, obr 18. Pro přesnost, je nutné uvést převod jednotek z kg/cm^2 na kPa, 1 kg/cm^2 je zhruba 100 kPa.



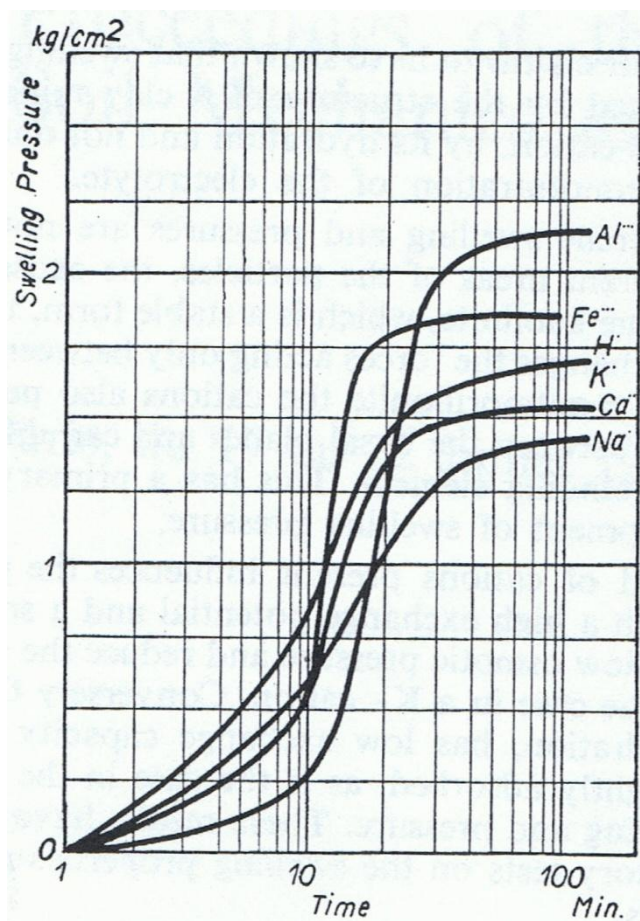
Obr. 15. Časový průběh přírůstu výšky vzorku bobtnáním pro typické vzorky braňanského bentonitu (Feda, 1970).



Obr. 16. Časový průběh přírůstu výšky vzorku bobtnáním pro typické vzorky mosteckého jílu (Feda, 1970).



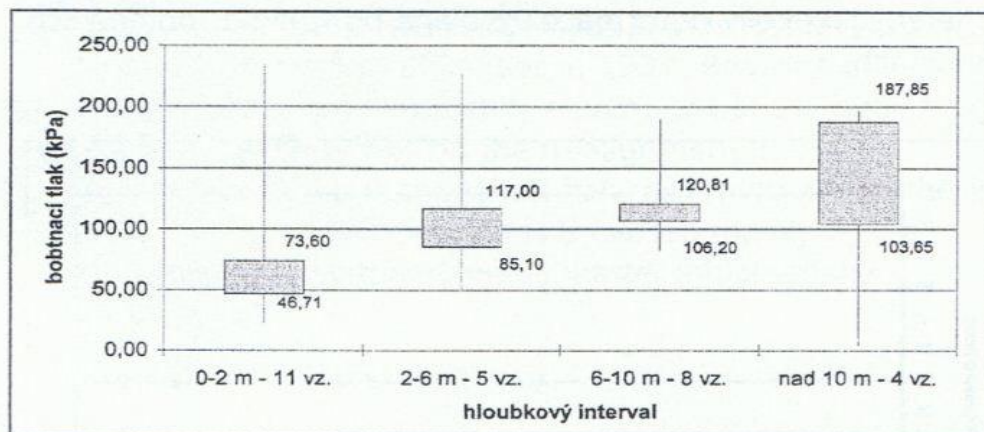
Obr. 17. Časový průběh přírůstu výšky vzorku bobtnáním pro typické vzorky jílu Brník (Feda, 1970).



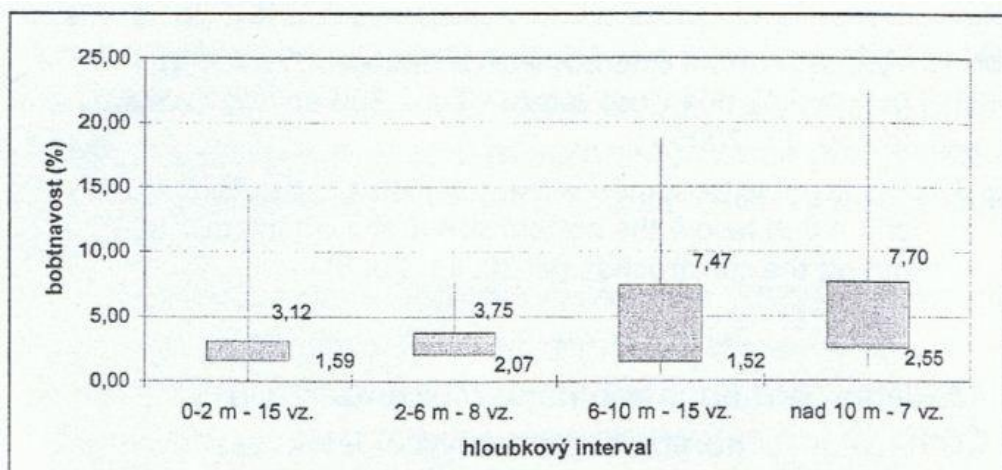
Obr. 18. Bobtnací tlaky kaolinitických jíľů (Kazda, 1961).

5.3.3 Třebovice, vlakový tunel

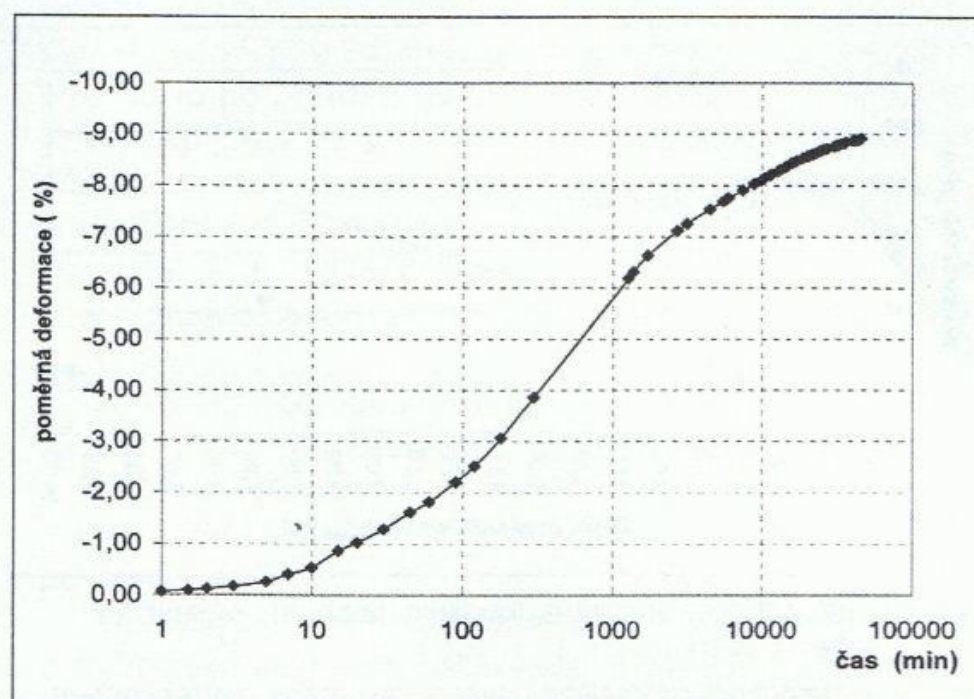
Pro Třebovický tunel (kapitola 5.2.1) byla řešena problematika bobtnání a jeho přírůstku v čase. Posouzení závislosti hodnot bobtnacího tlaku a bobtnavosti (lineárního bobtnání) na vzdálenosti od rozhraní kvartér – miocén, byla použita analýza, při které se vzorky rozdělily do podsouborů, v závislosti na vzdálenosti od zmiňovaného rozhraní. Výsledky jsou znázorněny na obr. 19 a 20. Závislost objemových změn v čase je ukázána na obr. 21 (Kresta, Martinec 2006).



Obr. 19. Hodnoty bobtnacího tlaku v závislosti na hloubkovém intervalu od rozhraní kvartér – miocén (Kresta, Martinec, 2006).



Obr. 20. Hodnoty bobtnání v závislosti na hloubkovém intervalu od rozhraní kvartér – miocén (Kresta, Martinec, 2006).



Obr. 21. Vzorek miocénních jílu – vývoj poměrné deformace v čase (Kresta, Martinec, 2006).

5.3.4 Shrnutí bobtnacích tlaků z vybraných lokalit

Z obrázku na kterých jsou znázorněny bobtnací tlaky z jednotlivých lokalit, je patrné, že bobtnací tlaky se pohybovaly v rozmezí od 180 do 250 kPa. Výjimkou je pouze Braňanský bentonit, u kterého byly bobtnací tlaky vyšší. To potvrzuje, že zeminy s vysokým obsahem jílových minerálů ze skupiny smektitů, mají vyšší bobtnací tlaky.

6. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo shromáždění informací o bobtnavých zeminách na území České republiky. Vzhledem k tomu, že význam bobtnání zemin pro geotechnickou praxi je ovlivněn lokálními podmínkami – např. stupněm nasycení a složením (původem) zemin, lze výskyt expanzivních zemin pouze zhruba předpovídat. Rešerše ukázala, že o bobtnavých zeminách na území ČR neexistuje dostatek informací, a že pro detailní stanovení rozmístění bobtnavých zemin na území České republiky by bylo zapotřebí provést rozsáhlý výzkum. Ten by musel zahrnovat rozsáhlé experimentální práce - měření bobtnacích tlaků, volného bobtnání a mineralogické analýzy. To je nad rámec této práce.

Z dostupné literatury se podařilo alespoň naznačit výskyt významně bobtnavých zemin na území České republiky. Jedná se především o oblast České křídové tabule (např. Třebovice), severočeské pánve (např. Most, Braňany), karpatské předhlubně (např. Brno), plzeňské pánve, jihočeské pánve a lokální výskyt v Příbrami, Kladně a lomu Brník.

Dále byly popsány a objasněny základní principy bobtnání a analyzovány různé významy termínu „bobtnání“ v inženýrskogeologické a geotechnické praxi. Jedná se o odlehčení nasycené zeminy, resp. „bobtnání“ stanovené normou ČSN, expanzi objemu nenasycené zeminy při snížení sání, tj. deformaci spojenou rovněž se snížením efektivní napjatosti, a o bobtnání popsané Kontou jako vnitřně krystalické a vnější osmotické, které je charakteristické pro některé jílové minerály. Bylo ukázáno, že pro jednoduché aplikace, např. zvedání plošných základů, je možné bobtnání analyzovat na základě jednoduché edometrické zkoušky bez ohledu na podstatu deformací.

7. SEZNAM LITERATURY

Alonso E. E., Gens A., Josa A., 1990. *A constitutive model for partially saturated soils*. Géotechnique 40, No. 3, str. 405 – 430.

Al-Rawas A. A., Goosen M. F. A., 2006. *Expansive soils, Recent advances in characterization and treatment*. Taylor & Francis Group, London.

Atkinson J. H., 2007. *The mechanics of soils and foundations*. Second edition. Taylor & Francis, New York, 442 str.

Chen F. H., 1975. *Foundations on expansive soils*. Developments in Geotechnical Engineering 12, Elsevier scientific publishing company, Amsterdam, 280 s.

ČSN CEN ISO/TS 17892-5, 2005. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemín – Část 5: Stanovení stlačitelnosti zemín v edometru*. Český normalizační institut, Praha, 27 str.

Feda J., 1970. Zvedání základové půdy vlivem bobtnání. Inženýrské stavby 9, str. 338 – 343.

Feda J., Boháč J., Herle I., 1993. *Areál Boby sport Brno, Mechanické vlastnosti základové půdy*. Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, Praha, 14 str.

Fredlund D. G., Rahardjo H., 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, New York, 517 str.

Havlíček J., Kazda J., 1961. *Soil Properties in Relation to Hydration of Exchangeable Ions*. Proceedings of the Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Volume I – Division 1-3A, 137 – 142 str.

Konta J., 1957. *Jílové minerály Československa*. Nakladatelství Československé Akademie věd, Praha, 319 str.

Konta J., 1994. *Jíl a člověk: Jílové suroviny ve službách člověka*. Společnost pro výzkum a využití jílu, Praha, 68 str.

Konta J., 2004. *Přednášky z teorie sorbitových a těsnících jílu*. XVII. konference o jílové mineralogii a petrologii, CNCG, Praha, 129 str.

Kresta F., Martinec P., 2006. *Příčiny bobtnání miocénních jílů u Třebovic v Čechách*. Geotechnika 1/2006, str. 21 – 27.

Nelson J. D., Miller D. J., 1992. *Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 288 str.

Mitchell J. K., Soga K., 2005. *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 577 str.

Pašek J., Šedivý M., Svoboda B., Žitný L. st., 2002. *K příčinám poruch staveb v centru města Kladna*. Geotechnika 2/2002, str. 15 – 16.

Seyček J., Luštincová L., Geoconsult Praha, 2005. *Škodlivé působení stromů na stavby v jílovitých půdách*. Geotechnika 3/2005, str. 16 – 20.

Weiss Z., Kužvart M., 2005. *Jílové minerály, jejich nanostruktura a využití*. Nakladatelství Katolinum, Praha, 281 str.

Zámek J., 2002. *Poznámky k příčinám poruch staveb v centru města Kladna*. Geotechnika 1/2002, str. 16 – 21.

Zámek J., 2002. *Vyjádření k ohlasu na článek „Poznámky k příčinám poruch staveb v centru města Kladna“*. Geotechnika 2/2002, str. 16 – 17.